

## PDF hosted at the Radboud Repository of the Radboud University Nijmegen

This full text is a publisher's version.

For additional information about this publication click this link.

<http://hdl.handle.net/2066/29871>

Please be advised that this information was generated on 2014-11-20 and may be subject to change.

# Het Standaard Model, een samenzwering van attoformaat

INAUGURELE REDE DOOR PROF. DR. NICOLO DE GROOT

Radboud Universiteit Nijmegen



INAUGURELE REDE  
PROF. DR. NICOLO DE GROOT



In zijn oratie keert Nicolo de Groot zich tegen alle doemdenkers die roepen dat de fysica zijn beste tijd heeft gehad. Er valt integendeel nog heel wat te ontdekken. Bijvoorbeeld in zijn vakgebied, de deeltjesfysica. Sinds de jaren zestig van de vorige eeuw heerst in deze wereld op atto-

niveau – een schaal van miljardsten van een miljardste meter – het Standaard Model. De voorspellingen van dit model over elementaire deeltjes en hun eigenschappen zijn de afgelopen decennia tot op grote precisie getoetst. Toch vertoont dit model ook barsten. Want waarom kan het slechts 4 procent van alle materie in het heelal beschrijven? Dat is een sterke aanwijzing dat het Standaard Model incompleet is en een diepere theorie verbergt. Over zo'n diepere theorie zijn vele ideeën, maar voorlopig ontbreekt nog experimenteel bewijs. De komende generatie deeltjesversnellers en de nieuwe metingen uit de astrofysica geven de kans om eindelijk een kijkje te nemen na wat er voorbij het Standaard Model ligt.

Nicolo de Groot (1964) studeerde Natuurkunde aan de Universiteit van Amsterdam. In 1993 promoveerde hij daar op precisiemetingen aan het Standaard Model. In zijn zoektocht naar het Higgsdeeltje en naar supersymmetrie werkte hij onder meer in de grote versnellerlaboratoria van CERN (Genève) en SLAC in Stanford (Californië). Sinds 2001 is hij senior onderzoeker bij het Rutherford Appleton Laboratory en sinds 2004 hoogleraar Experimentele hoge-energiefysica aan de Radboud Universiteit Nijmegen.

HET STANDAARD MODEL, EEN SAMENZWERING VAN ATTOFORMAAT

## **Het Standaard Model, een samenzwering van attoformaat**

*Rede in verkorte vorm uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van hoogleraar Experimentele hoge-energiefysica aan de Faculteit der Natuurwetenschappen, Wiskunde & Informatica op woensdag 29 november 2006*

**door prof. dr. Nicolo de Groot**

Vormgeving en opmaak: Nies en Partners bno, Nijmegen  
Drukwerk: Thieme MediaCenter Nijmegen

ISBN 90-9021386-4

© Prof. dr. Nicolo de Groot, Nijmegen, 2006

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar worden gemaakt middels druk, fotokopie, microfilm, geluidsband of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de copyrighthouder.

*Mijnheer de rector magnificus,  
geachte aanwezigen,*

Volgens John F. Kennedy is er een Chinese vervloeking die zegt “moge hij in interessante tijden leven”. Kenners van de Chinese taal hebben tevergeefs naar de oorsprong van deze uitdrukking gezocht, maar dat is nu niet zo belangrijk. Vandaag wil ik nagaan of de uitdrukking van toepassing is op mijn vakgebied, de deeltjesfysica. Kunnen wij deeltjesfysici zeggen dat we in interessante tijden leven of niet?

#### HET EINDE VAN DE WETENSCHAP?

In zijn boek *The End of Science: Facing the Limits of Knowledge in the Twilight of the Scientific Age* (1995) zegt de Amerikaanse wetenschapsjournalist John Horgan dat de wetenschap op haar eind loopt. Zijn argument is dat de wetenschap slachtoffer aan het worden is van haar eigen succes. Er is steeds minder te ontdekken. Aan de ene kant vormen de lichtsnelheid, het onzekerheidsprincipe uit de kwantumfysica en de chaos theorie harde grenzen aan wat we kunnen weten. Aan de andere kant is er de afgelopen honderd jaar zoveel ontdekt, dat alleen het invullen van de laatste details nog resteert. De kruimeltjes op de tafel na afloop van een feestmaal. Daarmee niet tevreden vervallen sommige wetenschappers in wat hij “ironische wetenschap” noemt. Hiermee bedoelt Horgan wetenschap die de connectie met de meetbare realiteit verloren heeft, en die nooit getest zal kunnen worden, speculatie dus. Als voorbeeld hiervan noemt hij de snaartheorie, die al twintig jaar als ultiem model voor het heelal gepresenteerd wordt, maar geen verifieerbare voorspellingen doet. Een ander voorbeeld is Linde, Andrei, de kosmoloog van Stanford University met zijn theorie dat er een oneindig aantal universa bestaat, ieder met zijn eigen natuurconstanten, een zogenaamd multiversum.

Ook anderen hebben deze doemboodschap over zuivere wetenschap laten horen. Zo zei Jo Ritzen, minister van onderwijs van 1989 tot 1998, over het Europese laboratorium voor deeltjesfysica CERN, dat er betere wetenschapssectoren waren om in te investeren. Hij werd hierin gesteund door Edith Cresson, eurocommissaris voor onderwijs, onderzoek en wetenschap van 1995 tot 1999. Kort hierna moest zij aftreden, beschuldigd van fraude, maar dat had niets met deze opmerking te maken. Tel hier nog eens bij op dat Stichting FOM, een stichting voor fundamenteel onderzoek der materie in haar laatste strategienota fundamenteel onderzoek definieert als onderzoek met een tijdshorizon tot commerciële toepassing van meer dan vijf jaar en we kunnen niet anders concluderen dat het van buitengewone moed getuigt dat de Faculteit van Natuurwetenschappen Wiskunde & Informatica en het College van Bestuur van de Radboud Universiteit Nijmegen een tweede hoogleraar in de experimentele hoge-energiefysica hebben benoemd. Ik zie inmiddels wat onrustig geschuifel in de corona. “Hebben we misschien een kat in de zak gekocht?” “Hadden we toch mediastudies moeten verster-

ken?” Een van de dingen die ik vandaag hoop te doen is u ervan te overtuigen dat we juist in zeer interessante tijden leven en dat u wel waar voor u geld zult krijgen.

Eerlijkheidshalve moet ik wel toegeven dat het begin van de jaren negentig van de vorige eeuw een buitengewoon saaie tijd was voor de deeltjesfysica. De nieuwe LEP versneller, waar zoveel van was verwacht had niets nieuws gevonden, en tot dan toe alleen maar het Standaard Model, de officiële theorie kunnen bevestigen. Tien jaar later staat het Standaard Model nog steeds recht overeind. Wel zijn er nu een aantal scheuren te zien in de fundering ervan. In de komende tien jaar verwacht ik dat we de ineenstorting kunnen meemaken en de geboorte van een nieuwe theorie die het Standaard Model nu al vijftientig jaar verborgen heeft gehouden.

#### AFSTANDEN

De titel van deze oratie is “Het Standaard Model, een samenzwering van attoformaat”. Het lijkt me op zijn plaats om eerst uit te leggen wat een attometer is. Wij mensen leven in een meterswereld. Zelf zijn we ongeveer een meter lang en de objecten in ons dagelijkse leven vallen uit biologische noodzaak in dezelfde categorie. Als we naar andere afstandschalen willen gaan doen we dat bij voorkeur in sprongetjes van duizend. Duizend meter, een kilometer, is een afstand die we ook nog regelmatig tegenkomen. Voor duizen kilometer, een Megameter, hebben we al een hulpstuk nodig, bijvoorbeeld een vliegtuig. Nog een stapje van duizend en ik ben de maan voorbij.

Als we de omgekeerde weg bewandelen en steeds kleiner gaan, zien we iets soortgelijks. Een duizendste meter, een millimeter, kunnen we nog prima met het blote oog zien. Een stapje van tien verder, naar een tiende millimeter of honderd micrometer, de diameter van een menselijke haar gaat nog net, maar om een rode bloedcel van tien micrometer te observeren moeten we naar een microscoop grijpen. Een bacterie als bijvoorbeeld E.Coli is nog een factor tien kleiner en ongeveer één micrometer groot. Een duizendste micrometer heet nanometer. Een doorsnee virus is honderd nanometer groot. Gaan we naar nog kleinere afstanden dan verlaten we de biologie en komen we in de scheikunde terecht met moleculen die één tot tien nanometer groot zijn. Dit is ook het gebied van de nanotechnologie.

Inmiddels zijn we halverwege op onze tocht naar de attometer. Een duizendste nanometer is een picometer. Een atoom is circa honderd picometer groot. Atomen, we zijn inmiddels in de natuurkunde aangeland, bestaan uit een kern van protonen en neutronen omgeven door een wolk van elektronen. Protonen hebben een positieve elektrische lading van een elementairlading, neutronen zijn ongeladen, en elektronen hebben een negatieve lading van een elementairlading. Protonen en neutronen zijn zeer klein, een duizendste picometer oftewel een femtometer. Dit betekent dat atomen vooral uit lege ruimte bestaan. Hoe leeg? Als ik een atoomkern zou voorstellen door een skippy-bal van een meter in Nijmegen, dan zou het elektron zich in Amsterdam

bevinden. Tot nu toe hebben we de elektronen niet verder kunnen splitsen en ook hebben wij geen grootte kunnen vaststellen. Neutronen en protonen daarentegen blijken te zijn opgebouwd uit drie deeltjes die we quarks noemen. De afstanden waarop de interacties tussen deze quarks en elektronen en een aantal andere deeltjes een rol spelen, kunnen worden uitgedrukt in attometers, duizendsten van een femtometer ( $10^{-18}$ ). Dit is het domein van het Standaard Model van de deeltjesfysica. Als ik nu mijn skippy-bal van een meter zo zou opblazen dat ons hele zonnestelsel, tot en met Pluto, erin past, dan is een attometer de grootte van een rode bloedcel. Gewone microscopen werken hier niet meer en we moeten deeltjesversnellers gebruiken.

Op zo'n kleine schaal zijn de klassieke wetten van de fysica niet meer geldig. Wij moeten onze toevlucht zoeken tot de kwantumfysica. Een belangrijk ingrediënt van de kwantumfysica is het onzekerheidsprincipe van Heisenberg. Dit principe houdt in dat we bepaalde grootheden niet tegelijkertijd met willekeurige precisie kunnen meten. Twee van de variabelen waar dit onzekerheidsprincipe voor geldt, zijn tijd en energie. Dit heeft verstrekende gevolgen. Als we de tijdsperiode maar kort genoeg houden, hebben we een grote onzekerheid van de energie en andersom. Met andere woorden we kunnen energie “lenen” uit het vacuüm, als we het maar snel genoeg teruggeven. Hiermee is de lege ruimte niet langer leeg, maar een kolkende brij van kort bestaande deeltjes. Energie en massa drukken we uit in electronvolt, de energie van een electron die een spanningsverschil van één Volt heeft doorlopen. De massa van een proton bijvoorbeeld is bijna 1 Gigaelectronvolt of GeV. Een ander element van de kwantumfysica is dat grootheden slechts een bepaald aantal waarden kunnen aannemen. Een voorbeeld hiervan zijn de energieniveaus in een waterstof atoom of, een ander voorbeeld, de spin van deeltjes, de rotatie om de eigen as. Deze spin blijkt alleen in veelvoud van een half maal de constante van Planck, een heel klein getal, voor te komen. Deeltjes die een even veelvoud, dus een heeltallige spin hebben worden bosonen genoemd, deeltjes met een half-tallige spin heten fermionen.

Wanneer wij kijken naar steeds kleinere afstanden, dan kijken we ook naar steeds hogere energieën en we kijken steeds verder terug in de tijd. De energieën die we nodig hebben om processen op een attometer te bekijken, zijn de energieën die ook aanwezig waren toen het heelal  $10^{-10}$  seconden oud was en nog maar een miljoen kilometers in doorsnee was. Vanaf dit moment, tot een honderdste seconde na de oerknal, hebben we de deeltjesfysica nodig om te begrijpen wat er met het heelal is gebeurd. Daarna begint de “gewone” kosmologie.

#### HET STANDAARD MODEL

Het Standaard Model van de deeltjesfysica geeft een beschrijving van de elementaire, dat wil zeggen de ondeelbare deeltjes en de krachten die ze op elkaar uitoefenen. Er zijn vier fundamentele krachten, ook wel wisselwerking genoemd, met een deeltje dat de

kracht overbrengt of draagt. Het Standaard Model beschrijft drie van de vier krachten. De eerste en meest bekende kracht is de zwaartekracht. Deze werkt op massa en is verantwoordelijk voor bijvoorbeeld de beweging van hemellichamen. Ze heeft een oneindig bereik, maar is veel te zwak om belangrijk te zijn voor processen tussen elementaire deeltjes. De zwaartekracht wordt met de Algemene Relativiteitstheorie van Einstein beschreven. Dit is geen kwantumtheorie. De zwaartekracht is dan ook niet in het Standaard Model meegenomen. We weten dat als we naar hele korte afstanden gaan, bijvoorbeeld naar de Planck-lengte van circa  $10^{-35}$  m, de zwaartekracht sterk wordt en er een kwantumtheorie nodig zal zijn om de wisselwerking te beschrijven. Op deze afstand houdt het Standaard Model dus zeker op correct te zijn. Het graviton deeltje is de drager van de zwaartekracht.

De tweede kracht, de elektromagnetische, werkt op elektrische ladingen en bindt elektronen in atomen. Het bereik van de kracht is eveneens oneindig, maar omdat de meeste atomen neutraal zijn, wordt dit minder opgemerkt. Het foton is de drager van deze kracht. Licht bestaat uit fotonen.

De derde kracht is de sterke kernkracht. Deze bindt bijvoorbeeld de protonen en neutronen in een atoomkern. De kracht is ongeveer honderd maal sterker dan de elektromagnetische kracht, maar het bereik is beperkt tot de afmetingen van een atoomkern. De sterke kracht wordt gedragen door gluonen.

De vierde kracht ten slotte, de zwakke kernkracht is verantwoordelijk voor kernfusie in de zon en het radioactief verval van elementen. Ze heeft een kort bereik en is ongeveer even sterk als de elektromagnetische kracht. De zware W en Z deeltjes dragen deze kracht. Deze deeltjes lijken op licht, maar dan zwaar.

Een overzicht van de krachten staat in Tabel 1:

Kracht	Drager deeltje (massa)	Bereik (m)
Zwaartekracht	Graviton (0)	$\infty$
Elektromagnetische kracht	Foton (0)	$\infty$
Sterke kernkracht	8 gluonen (0)	$10^{-15}$
Zwakke kracht	$W^{\pm}, Z^0$ (80, 91 GeV)	$10^{-18}$

Tabel 1: De krachten en hun dragers

Tabel 2. bevat de elementaire deeltjes die de bouwstenen van de materie zijn. We onderscheiden quarks en leptonen. Quarks komen niet los voor. Ze dragen een nieuw soort lading, kleur genaamd. Er zijn drie kleuren, rood, groen en blauw. De gluonen van de sterke wisselwerking binden de quarks in groepjes van 3. Voorbeelden hiervan zijn het proton (2 up 1 down quarks) en het neutron (1 up 2 down quarks), de bouwstenen

	1e familie	2e familie	3e familie	lading
Quarks	Up $u$	Charm $c$	Top $t$	$+2/3$
	Down $d$	Strange $s$	Bottom $b$	$-1/3$
Leptonen	Elektron $e$	Muon $\mu$	Tau $\tau$	$-1$
	Neutrino $\nu_e$	Neutrino $\nu_\mu$	Neutrino $\nu_\tau$	0

Tabel 2: De elementaire materie deeltjes

van atoomkernen. Leptonen kunnen vrij bestaan. Elektronen vormen de schil van alle atomen. Neutrino's komen vrij bij radioactief verval.

De tweede en derde families zijn kopieën van de eerste, met het verschil dat de deeltjes steeds zwaarder worden. Zij komen alleen in laboratoria en kosmische straling voor. Alle materiedeeltjes hebben dezelfde spin van  $1/2$  en worden ook wel fermionen genoemd.

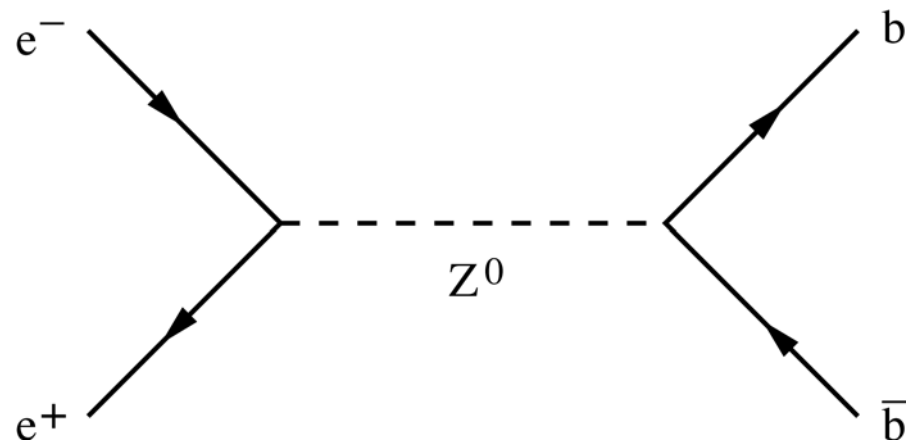
Alle materie deeltjes hebben daarnaast een anti-deeltje. Dit deeltje heeft dezelfde massa, maar de andere eigenschappen zoals bijvoorbeeld de elektrische lading zijn tegengesteld. Als antimaterie en gewone materie samenkomen, annihileren ze en produceren ze een flits van energie volgens de formule  $E = mc^2$  van Einstein. Antimaterie was aanvankelijk ingevoerd door Paul Dirac als een wiskundige truc om zijn vergelijkingen kloppend te maken, maar in 1933 werd tot ieders verbazing het anti-deeltje van het elektron, het positron ontdekt. Later zijn ook andere deeltjes zoals het anti-proton ontdekt. We denken dat tijden de oerknal materie en anti-materie in gelijke hoeveelheden gemaakt is.

Botsingsprocessen tussen elementaire deeltjes worden beschreven met Feynman-diagrammen, genoemd naar de theoretisch fysicus Richard Feynman. Een voorbeeld staat in Figuur 1, voor een botsing van een elektron met een positron waarbij een  $Z^0$  wordt geproduceerd. De  $Z^0$  vervalt vervolgens in een b quark paar. Ieder element in het diagram correspondeert met een onderdeel van de formule waarmee de waarschijnlijkheid voor dit proces kan worden uitgerekend. De inkomende deeltjes, de uitgaande deeltjes, de vertex (de plaats waar de interactie plaatsvindt en meerdere deeltjes samenkomen), de propagatoren (de interne lijnen van deeltjes), allemaal hebben ze hun eigen "Feynman regel" en door het spoor van de pijlen te volgen kunnen we zo de formule opschrijven.

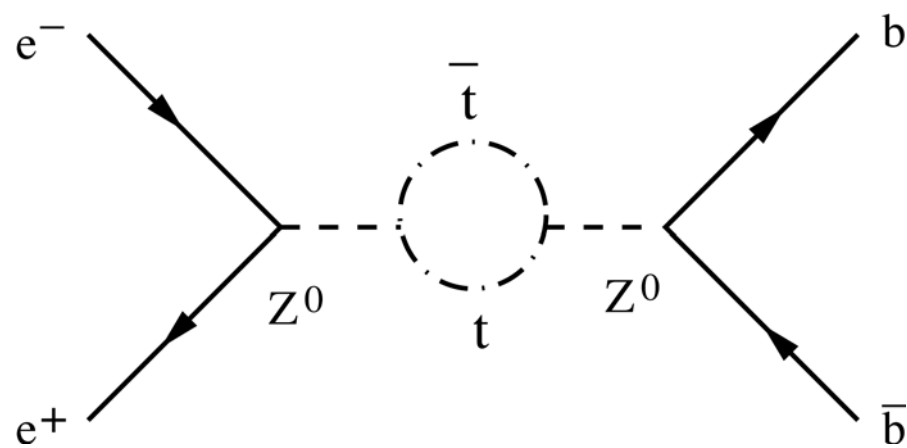
In het zojuist gegeven voorbeeld, kunnen we, aangezien de richting en energie van de inkomende en uitgaande deeltjes bekend is, die ook voor de interne deeltjes uitrekenen. Dit is niet altijd het geval. Het is ook mogelijk om diagrammen met een interne lus te maken. Een voorbeeld hiervan is Figuur 2. De energie die door de lus loopt, is niet te berekenen, en daarom moeten we alle mogelijke waarden gebruiken. Dit leidt in het



algemeen tot een oneindige waarde en er zijn speciale technieken voor nodig om weer tot een bruikbaar resultaat te komen. Omdat iedere mogelijke waarde van de energie in de lus is toegestaan, kunnen er ook deeltjes meedoen waarvoor normaal niet genoeg energie in de botsing aanwezig is. Op die manier kunnen metingen bij lagere energie toch informatie opleveren over zwaardere deeltjes.



Figuur 1: Een Feynman diagram voor b quark productie bij LEP



Figuur 2: Hetzelfde proces met een kwantumlus erin

Het Standaard Model is in de jaren zestig van de vorige eeuw ontwikkeld. Het begon in 1961 met Sheldon Glashow<sup>1</sup> die inzag dat de elektromagnetische en zwakke wisselwerking beschreven konden worden in één mathematisch model. Een van de problemen was dat in dit formalisme geen deeltjes met massa toegestaan waren en dat die in werkelijkheid toch bestonden. De oplossing kwam uit werk van Robert Brout, François Englert en Peter Higgs<sup>2</sup> die, in 1964, lieten zien dat een deeltje met spin nul met massa gebruikt kan worden om de andere deeltjes massa te geven bij voldoende lage energie. Abdus Salam en Steven Weinberg<sup>3</sup> integreerden in 1967 dit idee vervolgens in de theorie wat resulteerde in het moderne Standaard Model. Een overgebleven probleem was dat wanneer je diagrammen met een lus erin wilde uitrekenen er oneindig uitkwam. Gerard 't Hooft en Tini Veltman<sup>3</sup> lieten in 1972 zien hoe dit aangepakt kon worden en daarmee was het Standaard Model klaar om de confrontatie met het experiment aan te gaan.

#### DE STUITENDE CORRECTHEID VAN HET STANDAARD MODEL

De geschiedenis van de toetsing van het Standaard Model begint in 1983. Het model voorspelde het bestaan van zware dragers van de zwakke kracht, de W- en Z-deeltjes. Daarnaast voorspelde de theorie ook wat de massa's van deze deeltjes zou moeten zijn. In 1983 ontdekten de UA1 en UA2 experimenten op CERN eerst het W-deeltje en kort daarna het Z<sup>0</sup>-deeltje, met de voorspelde massa. Dit was het startschot voor een indrukwekkend experimenteel programma om het model te verifiëren en uit te vinden wat er achter het model zou kunnen liggen.

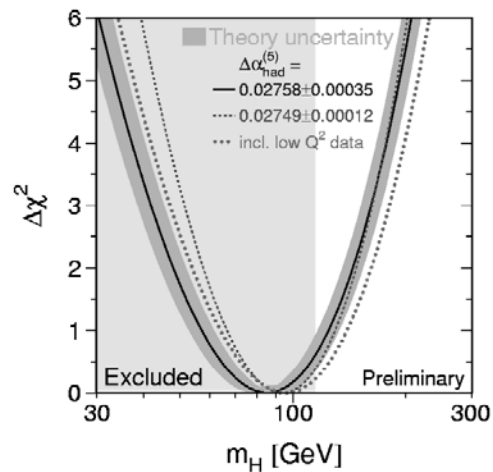
Eind jaren tachtig gingen twee grote projecten van start om precisie metingen aan het Standaard Model te doen. De ene was de Large Electron Positron versneller (LEP), een 27 kilometer lange cirkelvormige versneller bij het CERN in Genève, waarin elektronen met hun anti-deeltjes botsten. De energie van de deeltjes was zo gekozen dat ze precies een Z<sup>0</sup> deeltje konden produceren. Aan de versneller lagen vier detectoren die de signalen van de botsingen registreerden. LEP zou ongeveer zestien miljoen Z<sup>0</sup>-deeltjes produceren.

Vervolgens werd de machine aangepast om botsingen bij hogere energieën te produceren. Hiermee kunnen paren van W-deeltjes geproduceerd worden en hun eigenschappen te bestudeerd worden. Ook kan er naar nieuwe deeltjes gezocht worden. Het tweede project, de SLAC versneller bij het Stanford Linear Accelerator Center in Californië is een rechte versneller waar aan het einde twee bochten zitten om de elektronen en positronen bij elkaar te brengen. De versneller ligt midden op de St. Andreasbreuk een gebied bekend om zijn aardbevingen. De deeltjes in een versneller worden gestuurd door magneten die met een precisie van enkele micrometers gepositioneerd moeten worden. Dit is een van de redenen waarom deze versneller minder Z<sup>0</sup>-deeltjes heeft weten te produceren, ongeveer een half miljoen. Doordat het bij de SLAC mogelijk was om de spin van de botsende elektronen in een bepaalde richting te

prepareren en omdat de SLC een betere detector had, zijn toch een aantal van de meest nauwkeurige metingen aan het Standaard Model daar gedaan.

In totaal zouden meer dan tweeduizend fysici ruim tien jaar metingen doen bij LEP en SLD. Dit leidde tot 1435 publicaties die vrijwel allemaal over het Standaard Model gaan. Deze publicaties worden samen bijna vijftigduizend maal geciteerd. De ironie wil dat de meest interessante meting van beide versnellers korte tijd na hun start gedaan is. Beide versnellers hebben toen bepaald dat het Standaard Model drie families heeft, iets wat toen nog niet duidelijk was. De andere resultaten hebben slechts het Standaard Model bevestigd en de parameters met toenemende nauwkeurigheid bepaald.

Een deeltje dat niet ontdekt werd bij LEP is het Higgsdeeltje, waarschijnlijk omdat LEP niet genoeg energiebereik had om het te produceren. Wel kan LEP vaststellen dat het in ieder geval zwaarder moet zijn dan 114 GeV, meer dan honderd maal de proton massa. Verder is het mogelijk om de massa van het Higgs deeltje te schatten uit andere metingen. Door de kwantumcorrecties met een Higgs deeltje in de lus kunnen we de door alle precisie-metingen aan het Standaard Model samen te nemen, kijken welke waarde van de Higgs massa er het best bij past. Dit is gedaan in Figuur 3. Een waarde van  $\Delta\chi^2 = 0$  komt overeen met de waarde die het beste past. Een waarde van  $\Delta\chi^2 = 2$  heeft nog maar vijf procent kans correct te zijn. We zien dat een lage Higgs massa, zelfs beneden de LEP limiet, het beste past bij de precisie-metingen. Waarden tussen de 115 GeV en 150 GeV zijn ook nog acceptabel, maar het is zeer onwaarschijnlijk dat de Higgs zwaarder dan 200 GeV is.



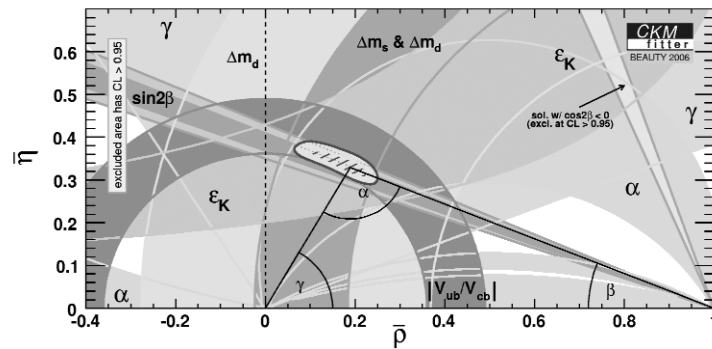
Figuur 3: De kwaliteit van de Standaard Model fit als functie van de Higgs massa

Ik heb het voorrecht gehad om aan zowel LEP als SLC te hebben mogen werken. Bij beide bestudeerde ik methodes om zware quarks, bottom en charm te vinden. Het Delphi experiment bij LEP, waarin ik mijn promotieonderzoek heb gedaan, werd geregeerd volgens een mediterrane poldermodel. Alles werd eerst in achterkamertjes voorgerekocht en daarna unaniem goedgekeurd. Het SLD experiment aan de SLC, waar ik drie jaar postdoc was, werd geregeerd door een verlicht dictator, Marty Breidenbach. Hij hieldt de wind er goed onder door eenvoudigweg meer van de detector te weten dan wie dan ook. Op het gebied van de analyse, waar ik werkzaam was, liet hij ons opmerkelijk vrij en dat leidde tot een heel productief klimaat. Het moge duidelijk zijn dat ik me bij SLD aanzienlijk prettiger voelde, al wil ik hier verder geen conclusies over maatschappelijk bestuur aan verbinden.

Bij het Tevatron, de versneller op Fermilab bij Chicago worden protonen op anti-protonen gebotst met een energie van 2 TeV, tien maal de maximale energie van LEP. Omdat de protonen opgebouwd zijn uit quarks die door gluonen samengebonden worden, weet je nooit wat er precies botst. Het Tevatron heeft twee detectoren CDF en DO. Rond de duizend onderzoekers hebben hier de afgelopen jaren bijna evenveel artikelen gepubliceerd met als hoogtepunt de ontdekking van het top quark in 1995. Het Tevatron produceert steeds meer data, en heeft een kans om als eerste het Higgs deeltje te zien. Ik ben ook zeer content dat onze groep actief meedoet in de zoektocht naar dit deeltje binnen het DO-experiment.

Een ander fraai voorbeeld van de veerkracht waarmee het Standaard Model zich nu al 25 jaar verzet tegen pogingen om er een gat in te schieten, is de quark sector. Het blijkt dat de zwaardere quarks die geproduceerd worden in botsingen niet helemaal dezelfde zijn als de zware quarks die daarna vervallen in lichtere deeltjes, maar dat ze een mengsel van de drie mogelijke quarks met dezelfde lading zijn. Een W-deeltje verbindt in de meeste gevallen twee quarks uit de zelfde familie, maar in sommige gevallen ook quarks uit verschillende families. In het Standaard Model hebben we vier variabelen nodig om dit effect te beschrijven. Twee hiervan, de vermenging tussen de eerste en tweede familie en tussen de tweede en derde familie zijn al vrij goed gemeten, over de andere twee – die de vermenging van de eerste met de derde familie beschrijven,  $\rho$  en  $\eta$  genaamd – was tot enkele jaren geleden veel minder bekend. Ze zijn bestudeerd bij LEP, bij Tevatron en bij de B-fabrieken, versnellers die speciaal gebouwd zijn om zoveel mogelijk deeltjes die b quarks bevatten te maken. Vanaf 2000 hebben het Belle experiment in Japan en het BaBar<sup>4</sup> experiment in Californië honderden miljoenen deeltjes met een b quark geproduceerd. Er was de hoop dat we met zoveel deeltjes zeldzame processen zouden kunnen observeren en daarmee gevoelig worden voor nieuwe fysica buiten het Standaard Model. De resultaten van een groot aantal metingen<sup>5</sup> van verschillende experimenten staan in Figuur 4. Iedere meting bepaalt een bepaalde

combinatie van  $\rho$  en  $\eta$  en is te zien als bijvoorbeeld een cirkelsegment of een paar lijnen. De conclusie is simpel. Alle metingen komen samen in het banaanvormige gebied rond  $\rho=0.15$ , en  $\eta=0.35$ . Het Standaard Model is perfect consistent en er is geen enkele aanwijzing voor nieuwe fysica.



Figuur 4: Verschillende metingen aan quark mixing

Ik heb zes jaar lang aan BaBar, een van de B-fabrieken, gewerkt. De productiviteit van het experiment was indrukwekkend, en overtrof zelfs die van LEP en Tevatron. Niet alleen de productie van deeltjes, maar ook die van publicaties werd fabrieksmatig aangepakt. Je kon een bepaalde eindtoestand van deeltjes kiezen en daarna was er een standaard recept dat iedereen diende te volgen. Na twee keer gaat dit behoorlijk vervelen en ik dwaalde al snel af naar het ontwerpen van nieuwe snelle elektronica – dat lukt nooit in één keer en is dus nooit saai – en het zoeken naar eindtoestanden die volgens het Standaard Model verboden waren. Bij dit laatste moest ook ik mijn meerdere in het Standaard Model erkennen.

#### BARSTEN IN HET STANDAARD MODEL

Als het Standaard Model zo'n succes is, waarom is het dan nodig om naar een diepere theorie te zoeken die het Standaard Model zou vervangen? Er is een aantal sterkte aanwijzingen dat het Standaard Model niet het uiteindelijke antwoord kan zijn. Laten we een aantal van deze eens onder de loep nemen.

Een van de problemen van het Standaard Model is dat het erg goed is in het voorspellen hoe iets zal gebeuren, maar weinig verklaring geeft waarom. Zelfs zonder neutrino massa's bevat het model achttien vrije parameters, constanten in de theorie die een willekeurige waarde kunnen aannemen. Dit zijn de massa's van negen fermionen, de koppelingsconstanten van de zwakke, sterke en elektromagnetische kracht, vier para-

eters die vermenging tussen de quarks beschrijven, de massa en de vacuüm verwachtingswaarde van het Higgs-deeltje. Als we de waarden van deze constanten experimenteel bepalen, hebben we een model waarmee we heel precies kunnen rekenen. Maar als we willen weten waarom de constanten de waarden hebben die ze hebben geeft het model geen enkele verklaring. En de constanten hebben bovendien vreemde waarden. Neem bijvoorbeeld de massa's van de fermionen. Het elektron is tweehonderd maal lichter dan het muon dat zelf weer zeventien keer lichter is dan het tau deeltje. Het zwaarste deeltje dat we kennen is het top quark, nog een keer honderd maal zwaarder. De precieze neutrino massa's zijn nog onbekend. Wel weten we dat ze ongeveer honderduizend maal lichter dan een elektron zullen zijn. Het is uiterst merkwaardig dat tussen deeltjes die in principe allemaal even fundamenteel zijn, zulke enorme massaverschillen zijn. Het Standaard Model biedt hier geen verklaring voor.

Iets anders wat moeilijk te verklaren is, is het grote aantal elementaire deeltjes. Iedere quark bestaat in drie kleuren, dus we hebben achttien quarks en zes leptonen. Met de anti-deeltjes erbij wordt het totaal 48. Verder zijn er nog het foton, de W- en Z-deeltjes, acht gluonen en, naar we vermoeden, het graviton. Met tenslotte het Higgs deeltje komen we op een totaal van 61 verschillende deeltjes uit, en deze zouden allemaal elementair zijn. Dit is moeilijk te aanvaarden. Toen Mendeleev in 1869 met zijn tabel van het periodiek systeem kwam, waren er 63 elementen bekend. Deze tabel was het startschot voor het moderne atoommodel dat de veelvoud aan elementen en hun patronen verklaarde. Toen de jaren vijftig van de vorige eeuw een wildgroei van nieuwe deeltjes liet zien, het zouden er uiteindelijk 36 worden, kwam Gell-Mann met zijn achtvoudige weg, die aan de basis van het quark model zou staan. 61 Verschillende deeltjes die allemaal elementair zijn, dat is wel erg veel. Merkwaardig genoeg is er onder de theoretici die een alternatief voor het Standaard Model zoeken weinig aandacht voor de mogelijkheid dat quarks en leptonen zelf ook weer samengestelde deeltjes zouden kunnen zijn.

Een ander argument waarom het Standaard Model incompleet zou zijn komt voort uit het idee dat de krachten uit de deeltjesfysica drie manifestaties van één enkele oerkracht zouden zijn. Wij kunnen deze oerkracht niet waarnemen omdat wij bij een te lage energie kijken en de oerkracht daar in drie componenten uiteengevallen is. Als wij naar een energieschaal gaan die hoog genoeg is zouden de krachten zich verenigen en zich weer als een enkele kracht manifesteren. Ditzelfde principe zien we in het Standaard Model met de elektromagnetische en zwakke kracht, maar nu zou de sterke kracht er ook bij betrokken zijn.

De sterkte van de kracht, uitgedrukt in de koppelingsconstante, blijkt af te hangen van de energieschaal waarop de kracht wordt waargenomen. Zo is voor de elektromagnetische wisselwerking bij lage energieën de koppelingsconstante gelijk aan  $1/137$ . Als we dezelfde wisselwerking bekijken bij deeltjes die afkomstig zijn van het verval van een

$Z^0$  deeltje, dan is de koppelingsconstanten al gegroeid tot  $1/129$ . De reden voor de variatie in sterkte is de kwantumcorrecties. Bij hogere energieën kunnen er meer deeltjes in de lussen meedoen. Hoe de sterkte verandert als functie van de energie is dus afhankelijk van welke deeltjes er zijn. Als we het verloop van de sterke, zwakke en elektromagnetische wisselwerking bekijken met alleen de deeltjes uit het Standaard Model, dan zien we dat er geen enkele energie is, waarbij de drie koppelingsconstanten dezelfde waarde aannemen. In uitbreidingen van het Standaard Model, bijvoorbeeld supersymmetrie waarover we het straks zullen hebben, is het door de extra deeltjes wel mogelijk de krachten op één punt in energie te laten samenkomen.

Een ander mysterie is de verdwijning van antimaterie uit ons heelal. We denken dat tijdens de oerknal materie en antimaterie in gelijke hoeveelheden geproduceerd zijn. Als wij in het tegenwoordige heelal kijken, zien we echter vrijwel uitsluitend gewone materie. De helft van ons heelal is dus verdwenen. Dit zou kunnen als de natuurwetten niet helemaal hetzelfde zouden zijn voor materie en anti-materie. Inderdaad is er een klein verschil in het Standaard Model. Dit hangt samen met de vermenging van quarks. We hebben dit verschil op vele manieren gemeten en het is perfect in overeenstemming met de voorspellingen van het Standaard Model. Alleen is het verschil in het Standaard Model bij lange na niet voldoende om de verdwijning van de antimaterie te verklaren. Dit betekent dat er ergens anders ook nog een verschil moet bestaan. Dit kan bij de leptonen zijn, waar het Standaard Model niets voorspelt, of bij nieuwe deeltjes. In beide gevallen hebben we een uitbreiding van het Standaard Model nodig.

Het Standaard Model heeft ook een belangrijk numeriek probleem. Het tot nu toe onontdekte Higgs deeltje heeft als enige een spin van 0. Wanneer wij de kwantumcorrecties op de massa van het Higgs deeltje uitrekenen, vinden we zoals gebruikelijk dat ze oneindigheden opleveren. Stel nu dat het Standaard Model slechts geldig is tot een bepaalde energieschaal  $\Lambda$ . Daarboven treedt het nieuwe model in werking. Als we alleen correcties tot energie  $\Lambda$  meenemen, dan groeien de correcties voor een deeltje met spin 0 met  $\Lambda^2$ , terwijl die voor gewone deeltjes veel langzamer, als  $\log \Lambda^2$  groeien. We verwachten nu dat de Higgs massa van een grootte in de orde van die energieschaal zal zijn. Indien het Standaard Model geldig is tot de Planck-massa van  $2.4 \times 10^{18}$  GeV, verwachten we een Higgs massa van eveneens  $2.4 \times 10^{18}$  GeV. Het Higgsdeeltje heeft echter een massa van minder dan 250 GeV.

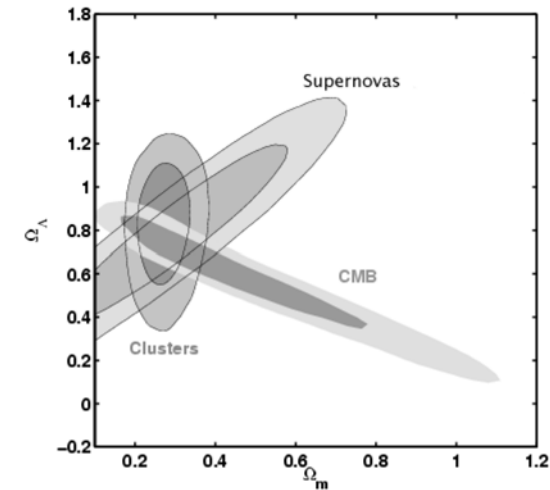
Er moet wel een buitengewone samenzwering zijn van grote getallen die elkaar opheffen. Dit staat bekend als het hiërarchie probleem van het Standaard Model en het is een sterke aanwijzing dat de geldigheid van het model bij veel lagere energieën ophoudt.

De belangrijkste aanwijzing dat het Standaard Model slechts een effectief model voor een beperkt energiebereik is, komt echter niet van versnellers, maar uit het heelal. De meest recente metingen laten zien dat het Standaard Model maar vier procent van

dat heelal beschrijft. Laten we eens kijken naar Figuur 5. Hierin staat langs de horizontale as de dichtheid van materie, zowel zichtbaar als onzichtbaar, in het heelal uitgezet. Langs de verticale as staat de hoeveelheid donkere energie. Dit is energie die niet uit materie voortkomt en er voor zorgt dat ons heelal langzaam uitdijt.

De kosmische microgolf achtergrondstraling (CMB) bestaat uit licht dat is uitgezonden door het hete plasma van de oerknal bijna veertien miljard jaar geleden, het is een soort echo daarvan. Deze foto van ons jonge heelal heeft gedurende miljarden jaren door een uitdijend universum gereisd. Uit de patronen in de straling kunnen we leren hoe de materie- en energieverdeling van het heelal er uitzag toen het beeld werd uitgezonden en hoe het sindsdien veranderd is. De CMB-data vertellen ons dat de materie en energieverdeling van ons heelal binnen de ellips met het bijschrift CMB moeten liggen.

Clusters van sterrenstelsels zijn de zwaarste objecten in ons heelal. Naast sterrenstelsels bevatten deze clusters ook grote hoeveelheden heet gas, dat röntgenstraling uitzendt. Uit de temperatuur van het gas en de omloopsnelheid van de sterrenstelsels kunnen we de totale massa van een cluster berekenen. Deze is veel groter dan de massa van de sterrenstelsels en het gas. De extra massa komt in de vorm van zogenaamde donkere materie, en metingen aan de clusters vertellen ons hoeveel donkere materie er is. Ook kunnen wij uit de verdeling van clusters wat leren over donkere energie. De clusters vertellen ons dat de materie- en energiedichtheid van ons heelal binnen de ellips met bijschrift Clusters moet liggen.



Figuur 5: De dichtheid van donkere energie ( $\Omega_\Lambda$ ) uitgezet tegen de hoeveelheid materie ( $\Omega_m$ ) in het heelal.

Supernova's zijn exploderende sterren die voor een korte tijd even helder als een heel sterrenstelsel kunnen schijnen en dan op een zodanig grote afstand waarneembaar zijn dat ze gebruikt kunnen worden om de ontwikkeling van het heelal te bestuderen. Een bepaald soort supernova straalt op haar hoogtepunt altijd dezelfde hoeveelheid licht uit. Door de helderheid hier op aarde te meten, kunnen we bepalen hoe ver weg de supernova staat. Door dit resultaat met de snelheidsmeting van de supernova te vergelijken kunnen we bepalen hoe de expansie van het heelal in het verleden verlopen is. Dit vertelt ons dat de energie- en materie verdeling van het heelal moet liggen in de ellips met bijschrift Supernovas.

De combinatie van de drie metingen geeft duidelijk aan dat we in een heelal leven met circa 73 procent donkere energie en 27 procent materie, waarvan 23 procent donkere materie en slechts 4 procent materie zoals we het uit het Standaard Model kennen.

Een verder argument voor donkere materie zien we in zwaartekracht lenzen. Hierin wordt licht afgebogen in een zwaartekrachtveld. Hoe meer materie het veld opwekt, hoe groter de afbuiging. Op deze manier kunnen we aan de afbuiging van het licht van een melkwegstelsel op grote afstand zien hoeveel materie zich tussen ons en het lichtgevend object bevindt. Het blijkt dat het licht veel meer wordt afgebogen dan verwacht zou mogen worden op grond van de zichtbare sterrenstelsels. Er is dus veel onzichtbare materie in het heelal.

Het Standaard Model geeft dus een prima beschrijving van 4 procent van ons heelal. Van de overige 96 procent weten we heel weinig. Wie zei er ook alweer dat er zo weinig overbleef om te ontdekken?

#### NA HET STANDAARD MODEL

Welke theorie zal in de toekomst het Standaard Model vervangen? Niet gehinderd door experimentele data die aangeven wat er achter het Standaard Model ligt, speculeren theoretici er vrolijk op los.

Supersymmetrie of  $\text{susy}^6$  is een elegante oplossing voor het hiërarchie probleem. Daarnaast heeft ze een aantal andere aantrekkelijke eigenschappen. Zo komen in een supersymmetrische variant van een Grote Verenigde Theorie de sterkte van de koppelingen van de krachten wel bij elkaar. Verder is het lichtste supersymmetrische deeltje, mits het stabiel is, een goede kandidaat voor de donkere materie in het heelal.

In  $\text{susy}$  wordt de vierdimensionale ruimte-tijd uitgebreid met extra kwantumdimensies. De Lorentz transformaties uit de speciale relativiteitstheorie worden aangevuld met een set  $\text{susy}$  transformaties die een deeltje met een halftallige spin in een heeltallige spin veranderen en omgekeerd. Als we twee keer een  $\text{susy}$  transformatie achter elkaar toepassen, krijgen we weer een Lorentz transformatie terug. Dit verband tussen de inwendige eigenschappen van deeltjes, in dit geval de spin, en de structuur van ruimte-tijd is de reden dat de ontdekking van  $\text{susy}$  gezien wordt als de eerste stap

op weg naar een theorie van alles, waarbij ook de zwaartekracht met de andere drie krachten verenigd zou kunnen worden. Dit wordt nog steeds gezien als de heilige graal van de fysica.

De deeltjes in het Standaard Model hebben ofwel spin  $1/2$  voor de quarks en leptonen, spin  $1$  voor de dragers van de krachten (het gluon, de  $W$ - en  $Z$ -deeltjes en het foton) en spin  $0$  voor het Higgs deeltje. In  $\text{susy}$  hebben alle deeltjes een zogenaamde superpartner. Deze heeft dezelfde elektrische lading en koppelingssterkte van de krachten, maar de spin verschilt met een  $1/2$ . De partners met spin  $0$  van de fermionen worden squarks en sleptons. De partner van het gluon is een spin  $1/2$  gluino. De partners van de Higgs deeltjes, er zijn er meerdere in  $\text{susy}$ , en het foton en de  $W$ - en  $Z$ -deeltjes vormen een aantal spin  $1/2$  charginos, aangegeven met  $\tilde{\chi}^+$ , en neutralinos, aangegeven met  $\tilde{\chi}^0$ .

In supersymmetrische theoriën blijft het aantal leptonen en baryonen (deeltjes opgebouwd uit drie quarks) niet noodzakelijkerwijs behouden. Dit kan leiden tot het verval van het proton en uiteindelijk alle materie. Dit is nooit waargenomen en we kunnen het voorkomen door een nieuwe symmetrie te introduceren die R-pariteit genoemd wordt. Alle gewone deeltjes hebben een R-pariteit  $+1$  en alle  $\text{susy}$ -partners een R-pariteit van  $-1$ . Een gevolg hiervan is dat  $\text{susy}$  deeltjes in paren geproduceerd worden en dat het lichtste supersymmetrische deeltje stabiel is. Dit deeltje is in de meeste gevallen elektrisch neutraal en daarmee een prima kandidaat voor de donkere materie in ons heelal.

Een andere aanpak begint met de zwakte van de zwaartekracht. De zwaartekracht tussen twee objecten neemt af met het kwadraat van de afstand tussen de objecten. Dit is een direct gevolg van het feit dat we in drie ruimtelijke dimensies leven en dat een bol daarin een twee dimensionaal oppervlak heeft. Stel nu dat er extra dimensies bestaan waarin de zwaartekracht zich kan uitstrekken. Het eerste probleem is dat wij maar drie dimensies zien. Maar stel nu dat de extra dimensies opgerold zijn als een buisje. Als de diameter van mijn buisje maar klein genoeg is, zou dat geen probleem met de zichtbare wereld opleveren en nog steeds een zwaartekracht geven die met het kwadraat van de afstand zwakker wordt. Als ik nu naar steeds kleinere afstanden ga, zullen de opgerolde dimensies ineens bereikbaar worden en zal de zwaartekracht ineens afnemen als de vierde of hogere macht van de afstand. Tegen de tijd dat ik bij een attometer zit, is de zwaartekracht van vergelijkbare sterkte als de andere interacties. Moderne experimenten aan de zwaartekracht laten zien dat de variatie met het kwadraat van de afstand geldt tot afstanden van een paar tiende millimeter. Daarbeneden worden de massa's simpelweg te klein om nog te kunnen meten. Modellen<sup>7</sup> met extra dimensies voorspellen dat er nieuwe deeltjes kunnen ontstaan bij energieën van enkele TeV.



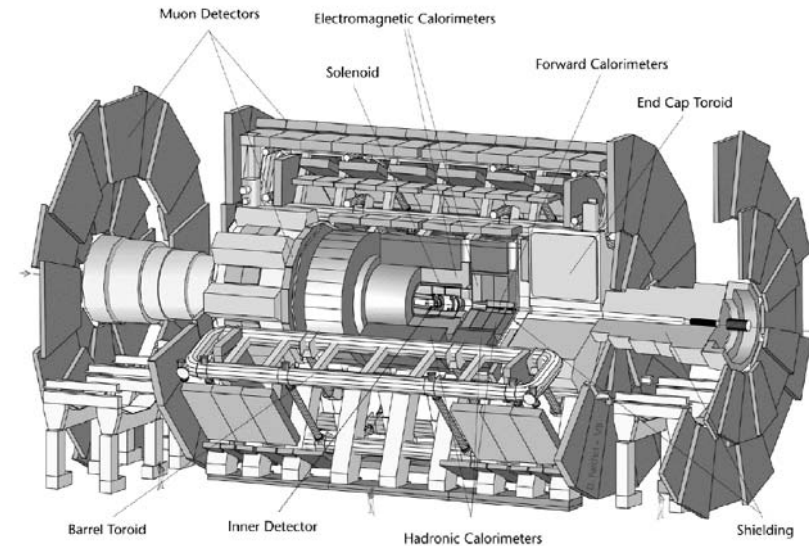
## DE WEG VOORWAARTS

We leven in interessante tijden. Het Standaard Model is een triomf van de moderne wetenschap, maar het speelt in blessuretijd. Wat gaat men, of liever wat gaan wij eraan doen om het Standaard Model definitief te ontmaskeren?

De Large Hadron Collider (LHC) is een versneller op CERN in dezelfde tunnel van 27 km als de LEP-versneller. Ditmaal worden er protonen op protonen gebotst met een totale energie van 14 TeV, zeven maal het huidige record van Tevatron. Omdat protonen makkelijker te produceren en te bewaren zijn dan anti-protonen kan de LHC ook veel meer botsingen produceren dan het Tevatron. Dit maakt het mogelijk om het Higgs deeltje te ontdekken tot een massa van vele honderden GeV. Nieuwe deeltjes zoals in supersymmetrie of extra dimensies kunnen we zelfs vinden tot massa's van enkele TeV. Als we supersymmetrie kunnen uitsluiten, zou dat ook groot nieuws zijn. Het zou het einde vande snaartheorie zijn die supersymmetrie als noodzakelijk ingrediënt heeft. Alhoewel, ik ben er zeker van dat duizenden zeer intelligente snaartheoretici als ze in hun bestaan bedreigd worden, in staat zullen zijn met een snaartheorie te komen die supersymmetrie juist uitsluit.

Atlas<sup>8</sup> is één van de twee algemene detectoren bij de LHC. Het is een kathedraal van een detector, 25 bij 25 bij 40 meter groot en bestaand uit diverse subcomponenten. Een schematisch plaatje van Atlas staat in Figuur 6. Aan Atlas alleen werken op het ogenblik meer dan tweeduizend mensen, die proberen alles klaar te hebben voor de start van LHC in 2007. Ook mijn groep aan de Radboud Universiteit Nijmegen werkt hard aan de voorbereiding van deze start. We zijn bezig een groot aantal elektronische modules te bouwen voor de muon detectoren. Dat zijn de grote detectoren aan de buitenkant. Zij zorgen voor de identificatie van muonen bij de botsingen. Muonen zijn relatief zeldzaam in botsingen. Ze worden geproduceerd in zwakke interacties, zoals het verval van Higgs deeltjes en supersymmetrische deeltjes en zijn dus een prima instrument om die gebeurtenissen, soms maar een handjevol, uit de miljarden anderen te halen. Dit is waar ik de komende jaren verwacht de meeste tijd aan te besteden. Op zoek naar muonen van het verval van Higgs deeltjes en supersymmetrische deeltjes.

We hebben gezien hoeveel belangrijke informatie over deeltjesfysica de laatste jaren uit de ruimte komt. Ik ben dan ook heel tevreden dat onze groep en die van sterrenkunde zich in 2005 aangesloten hebben bij het Pierre Auger Observatorium. Auger bestaat uit zestienhonderd detectoren die op een afstand van anderhalve kilometer van elkaar zijn opgesteld op de pampa van Argentinië. Auger is gevoelig voor kosmische stralen met de hoogste energie ooit gemeten. Deze botsen op de atmosfeer met een energie die zelfs die van de LHC te boven gaat. Door het LOFAR project in Nederland zitten we in een mooie positie in Auger. Wij kunnen namelijk onze expertise op het gebied van radiodetectie inbrengen. Dit kan leiden tot een veel betere bepaling van de energie van de meest energetische en dus meest interessante kosmische stralen.



Figuur 6: De Atlas detector

De ontdekking van het Higgs deeltje wordt vaak genoemd als de heilige graal van de deeltjesfysica. Dit is volstrekt onjuist. Het is geen einde, het zal een begin zijn van een hele nieuwe periode. De LHC is een grof instrument. Zodra wij resultaten hebben van de LHC en weten hoe zwaar de Higgs is en wat voor verdere deeltjes er nog zijn, is er behoefte aan een precisie instrument om in detail de eigenschappen van de deeltjes te bestuderen. Dat instrument is de International Linear Collider, een rechte versneller waar elektronen en positronen op elkaar zullen botsen bij een energie van een half TeV. Het ontwerp ligt op het ogenblik op de tekentafel; ook de locatie en financiering zijn nog niet rond. De verwachting is dat we in het volgende decennium met de bouw kunnen beginnen en rond 2018 de eerste botsingen kunnen verwachten. Het is belangrijk om nu al de detector hiervoor te ontwerpen. Ik ben vooral geïnteresseerd in de ontwikkeling van een detector waarmee het mogelijk is om met grote precisie vast te stellen wat voor soort quark er in een botsing geproduceerd is. De zware quarks leven iets langer en kunnen een korte afstand afleggen voor ze vervallen. Met precisie metingen van de vervalsproducten kunnen we b- en c quarks herkennen. Dit is een krachtig instrument om nieuwe fenomenen niet alleen te ontdekken, maar ook te begrijpen.

## CONCLUSIE

Wij gaan een fascinerende tijd tegemoet. De komende 10 jaar zullen ons eindelijk in staat stellen om door het Standaard Model heen te breken en iets te leren over de andere 96 procent van ons heelal. De LHC heeft volop potentieel voor ontdekkingen van Nobelprijs niveau. Delen met tweeduizend fysici zal niet eenvoudig zijn, maar net als bij de Olympische Spelen geldt, dat meedoen het belangrijkste is. Het is dan ook prettig om te zien dat sinds mijn aanstelling Ryanair vanuit ons lokale vliegveld Niederrhein een dagelijkse vlucht naar Stockholm onderhoudt.

Het zijn mooie tijden om een deeltjesfysicus te zijn!

## DANKWOORD

Allereerst wil ik de Faculteit der Natuurwetenschappen, Wiskunde & Informatica en het College van Bestuur bedanken voor het in mij gestelde vertrouwen. Mijn collegas binnen het IMAPP hebben mij hartelijk verwelkomd en vanaf het begin voor een stimulerende werkomgeving gezorgd. Wij gaan de komende jaren mooie dingen doen!

De Stichting FOM heeft mij op diverse momenten in mijn carrière financieel ondersteund, het meest recent in de vorm van een projectruimtevoorstel voor het onderzoek naar supersymmetrie bij Atlas. Deeltjesfysica is “Big Science” en dat doe je niet alleen. De hoge-energiefysica groep van de Radboud Universiteit Nijmegen maakt deel uit van het NIKHEF samenwerkingsverband waarbinnen ik door de jaren heen heel prettig samengewerkt heb. Ik ben NIKHEF ook dankbaar voor de steun bij het voortzetten van de leerstoel die ik thans bekleed.

Door de jaren heen heb ik met een groot aantal mensen samengewerkt op CERN, in de VS en in Engeland. Van velen heb ik iets geleerd en sommigen zijn mijn vrienden geworden. Ik kan ze niet allemaal individueel bedanken, maar ik ben ze dankbaar dat ze de afgelopen twintig jaar interessanter en ook aangenamer hebben gemaakt.

Mijn promotores, Bert Diddens, Karel Gaemers en Jan Timmermans, met jullie hulp heb ik de overstap van theoretische naar experimentele natuurkunde gemaakt. Het is een beslissing geweest waar ik nog steeds tevreden over ben. Zonder jullie was het veel moeilijker geweest.

Op de middelbare school heb ik twee natuurkunde leraren gehad, waarvan een helaas jong is overleden. Ik was er toen van overtuigd dat experimenteren voor degenen was die geen gedachtenexperimenten konden doen. Meneer de Vries, meneer Ouwekerk, jullie hadden gelijk. Experimentele fysica is niet alleen de enige manier om werkelijk vooruitgang te boeken, het is ook nog leuk.

Mijn moeder heeft mij door mijn school en studietijd altijd veel steun gegeven, en mij toch vrijgelaten om te doen wat ik het meest interessant vond. Ook in de latere jaren waarin ik in het buitenland woonde zorgde zij voor een stabiele plaats om naar terug te keren.

Mijn ooms, tantes en nichtjes (ik was de oudste) en goede vrienden, dank jullie wel voor de gezelligheid buiten mijn werk.

Met mijn vrouw Silvia heb ik een reis van dertien jaar gemaakt. Deze heeft ons van Genève via Californië en Engeland naar Nijmegen geleid. Toen wij elkaar leerden kennen spraken we Frans samen, later werd dit Engels en nu is het meestal Nederlands. Dank je dat je de hele weg meegegaan bent. Ik hoop dat de reis nog lang doorgaat, maar nu even zonder verdere verplaatsingen en nieuwe talen. Alex en Vincent, bedankt voor de afleiding

*ik heb gezegd.*

## REFERENTIES

1. S.L. Glashow, Nucl. Phys. B22:579, 1961  
S. Weinberg, Phys. Lett. 19:1264, 1967  
A. Salam in "Elementary Particle Theory", 367 (Almqvist en Wiksell, Stockholm 1968)
2. P.W. Higgs, Phys. Lett 12:132, 1964  
F. Englert en R. Brout, Phys Rev. Lett 13:321, 1964
3. G. 't Hooft en M.J.G. Veltman, Nucl. Phys. B44:189-213, 1972
4. Zie <http://www.slac.stanford.edu/BFROOT/>
5. <http://www.slac.stanford.edu/xorg/hfag/>
6. A. Neveu and J.H. Schwartz, Nucl. Phys. B31:86, 1971  
J. Wess and B. Zumino, Nucl. Phys. B78:39, 1974
7. N. Arkani-Hamed, S. Dimonopoulos and G.R. Dvali, Phys. Lett. B429,:263, 1998  
L. Randall and R. Sundrum, Phys.Rev.Lett. 83:3370, 1999
8. Zie <http://atlas.web.cern.ch/Atlas/index.html>